

Available online at: <http://reactor.poltekatiptdg.ac.id/>

REACTOR
Journal of Research on Chemistry and Engineering

| ISSN Online 2746-0401 |



Analisis Potensi Eco-Enzyme dari Limbah Kulit Buah dalam Penyisihan COD pada Air Sungai Tercemar Secara Batch

Izraini Islamiati Putri¹, Ansiha Nur², Puti Sri Komala³

¹ Program Studi Magister Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, Padang, Sumatera Barat, Indonesia

² Program Studi Magister Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, Padang, Sumatera Barat, Indonesia

³ Program Studi Magister Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, Padang, Sumatera Barat, Indonesia

ARTICLE INFORMATION

Received: April 27, 2026

Revised: June 05, 2026

Available online: June 12, 2026

KEYWORDS

Eco-enzyme, fruit peels, COD, batch system, polluted river water

CORRESPONDENCE

Name: Ansiha Nur

E-mail: ansiha@eng.unand.ac.id

A B S T R A C T

River water pollution due to high organic waste load has become a serious environmental issue, marked by high COD values. This study aims to analyze the potential of eco-enzyme from fruit peel waste in reducing COD values in batch-contaminated river water. Eco-enzyme was made from banana, orange, watermelon, papaya, and pineapple peels with a ratio of 3:1:10 (organic material:molasses:water) thru three months of fermentation. Testing was conducted on artificial river water with concentration variations of 5%, 10%, and 15% over 12 days. The parameters measured included pH, temperature, DO, and COD. The results showed that the eco-enzyme has protease, amylase, and lipase bioactivity. The decrease in COD values was intensive from day 1 to day 5 and reached a steady state from day 9 to day 12. A 5% concentration provided the lowest final COD value (22-30 ppm) with banana and pineapple peels as the best raw materials.

PENDAHULUAN

Ketersediaan air bersih merupakan kebutuhan dasar yang menentukan keberlanjutan kehidupan masyarakat. Pencemaran badan air khususnya sungai masih menjadi tantangan serius karena berdampak langsung terhadap kuantitas maupun kualitas air bersih. Beban pencemaran tersebut bersumber dari berbagai aktivitas, mulai dari limbah industri yang membuang senyawa toksik, limbah pertanian yang kaya nutrisi, hingga limbah domestik berupa tinja dan sampah rumah tangga yang langsung dibuang ke aliran sungai [1]. Kombinasi sumber-sumber pencemaran ini menyebabkan kualitas air sungai menurun secara signifikan dan tidak lagi memenuhi standar peruntukan yang ditetapkan pemerintah. Standar mutu air tersebut diatur dalam Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, yang membagi mutu air ke dalam empat kelas peruntukan (Kelas I-IV) dengan baku mutu parameter seperti pH, DO, dan COD pada masing-masing kelas [2].

Sungai Batang Arau di Kota Padang merupakan salah satu badan air yang menghadapi tekanan pencemaran

tinggi. Hasil penilaian mutu air berbasis Indeks Pencemaran (IP) di enam titik pengamatan menunjukkan hanya dua titik (Lubuk Paraku dan Jembatan Beringin) yang masih memenuhi baku mutu (IP < 1), sedangkan empat titik lainnya termasuk kategori tercemar dengan nilai tertinggi 1,65 di Muaro (Siti Nurbaya) [3]. Mengacu pada PP No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, mutu Sungai Batang Arau saat ini hanya memenuhi Kelas IV (peruntukan irigasi), sementara Pemerintah Kota Padang menargetkan peningkatan ke Kelas II agar dapat dimanfaatkan untuk perikanan dan wisata. Sungai Batang Arau dipilih sebagai acuan kajian karena merupakan sungai utama yang melintasi kawasan permukiman padat Kota Padang sekaligus menjadi target peningkatan kelas mutu air oleh pemerintah daerah, sehingga menyediakan kasus yang representatif untuk menguji teknologi pengolahan air sederhana. Untuk mencapai target peningkatan kelas mutu tersebut, pemerintah dan masyarakat memerlukan upaya pengolahan air yang murah, mudah diterapkan, dan ramah lingkungan.

Salah satu pendekatan pengolahan ramah lingkungan adalah pemanfaatan *eco-enzyme*, yaitu cairan hasil

fermentasi limbah organik (kulit buah/sayuran), molases, dan air, yang kaya enzim aktif dan mikroorganisme. Studi sebelumnya menunjukkan *eco-enzyme* pada konsentrasi 5-10% mampu menurunkan nilai Chemical Oxygen Demand (COD) dan Total Dissolved Solids (TDS) pada limbah domestik mulai hari ke-3 hingga ke-5 [4]. Cairan ini juga bersifat multifungsi sebagai pembersih dan disinfektan, dengan kinerja yang sangat dipengaruhi oleh jenis bahan baku kulit jeruk, misalnya, menghasilkan aroma khas dan kemampuan penjernihan air yang baik [5].

Pengolahan air limbah dengan *eco-enzyme* umumnya dilakukan secara batch karena prosesnya sederhana, mudah dikontrol, dan sesuai untuk skala laboratorium. Sistem batch merupakan reaktor tertutup dengan volume dan waktu reaksi tertentu tanpa aliran masuk atau keluar, sehingga memungkinkan kontrol penuh terhadap kondisi reaksi serta evaluasi kinerja *eco-enzyme* dalam rentang waktu yang terdefinisi.

Penelitian Das *et al.* (2024) terhadap limbah tekstil menunjukkan *eco-enzyme* dari kulit pisang, nanas, dan jeruk yang difermentasi tiga bulan dengan gula merah dan air mampu menurunkan COD 81-85%, serta meningkatkan DO setelah 100 jam pengolahan [6]. Sementara itu, aplikasi *eco-enzyme* pada air Sungai Borang dengan dosis 20 dan 40 ppm dapat menurunkan konduktivitas, TDS, dan zat organik hingga memenuhi baku mutu air bersih sesuai Permenkes No. 492 Tahun 2010, walaupun efektivitasnya menurun setelah hari ke-7 [7].

Eco-enzyme juga berpotensi mendukung proses *self-purification* sungai dengan meningkatkan aktivitas mikroorganisme pengurai dan kadar oksigen terlarut [8]. Meski demikian, sebagian besar studi yang ada masih terbatas pada limbah spesifik (domestik atau tekstil), sehingga aplikasinya pada air tercemar yang disimulasikan secara artifisial khususnya yang merefleksikan karakter Sungai Batang Arau belum banyak dikaji.

Berdasarkan celah penelitian tersebut, penelitian ini mengkaji bioaktivitas dan kinerja *eco-enzyme* dari limbah kulit buah pada berbagai konsentrasi dalam menurunkan nilai COD air sungai tercemar artifisial secara batch, sekaligus mengevaluasi kesesuaian hasilnya dengan baku mutu kelas air menurut PP No. 22 Tahun 2021.

METODOLOGI

Pembuatan Eco-enzyme

Lima jenis kulit buah (pisang, jeruk, semangka, pepaya, dan nanas) diperoleh dari pasar terdekat sebagai bahan baku utama, kemudian dicuci bersih dan dipotong

berukuran 1-2 cm. Larutan *eco-enzyme* dibuat dengan rasio 3:1:10 (bahan organik : molases : air), yaitu 1,05 kg kulit buah (rasio dihitung berdasarkan basis massa untuk bahan organik dan basis volume untuk molases dan air, sesuai konvensi 3:1:10 pada literatur), 500 mL molases, dan 5 L air, mengikuti metode Hemalatha *et al.* (2020) [9]. Campuran diaduk perlahan, dimasukkan ke dalam wadah plastik kedap udara, lalu difermentasi secara anaerob selama minimal tiga bulan pada tempat sejuk dan kering dengan ventilasi memadai. Setelah masa fermentasi selesai, cairan disaring untuk memisahkan ampas padat sehingga diperoleh *eco-enzyme* siap pakai dengan volume akhir sekitar 5 L.

Karakterisasi dan Uji Bioaktivitas

Karakterisasi *eco-enzyme* meliputi pengukuran pH, suhu, DO, dan COD. Nilai pH diukur dengan pH meter terkalibrasi (SNI 6989.11:2019), suhu dengan termometer celup (SNI 6989.23:2005), DO ditentukan secara elektrometri menggunakan DO meter sesuai SNI 6989.14:2004, dan COD diukur dengan metode refluks tertutup-titrimetri/spektrofotometri (SNI 6989.2:2019). Uji bioaktivitas difokuskan pada tiga enzim utama yang berperan dalam degradasi bahan organik kompleks pada air limbah, yaitu protease, amilase, dan lipase. Variasi pH (6; 6,5; 7; 7,5; dan 8) digunakan untuk melihat aktivitas enzim pada kondisi asam, netral, hingga basa, mengingat amilase memiliki pH optimum 6-7, protease 7-9, dan lipase 7-8 [10], [11].

Aktivitas protease diukur dengan metode titrimetri *Casein Digestion Unit* (CDU). Reaksi antara kasein dan ekstrak enzim dalam buffer fosfat 1 M diinkubasi 15 menit, kemudian dihentikan dengan TCA 5%. Supernatan dianalisis dengan metode Lowry dan absorbansi dibaca pada 620 nm. Aktivitas amilase diukur dengan metode 3,5-dinitrosalisilat (DNS) [10] menggunakan pati 1% sebagai substrat dan maltosa sebagai standar pembanding. Aktivitas lipase ditentukan dengan metode titrimetri menggunakan minyak zaitun sebagai substrat; campuran reaksi diinkubasi pada suhu 37 °C selama 15 menit, kemudian dititrasi dengan NaOH menggunakan indikator timolftalein hingga muncul warna biru muda [6].

Pembuatan Air Sungai Artifisial

Air sungai artifisial disiapkan untuk menyimulasikan air tercemar ringan dengan karakter mendekati Sungai Batang Arau. Glukosa (C₆H₁₂O₆) digunakan sebagai sumber karbon (C) dengan target COD 3,52 mg/L pada volume 500 mL. Untuk mendekati karakter pencemaran ringan Sungai Batang Arau yang sebagian besar bersumber dari limbah domestik permukiman di sekitar hulu (seperti kawasan Padang Besi), ke dalam larutan juga ditambahkan deterjen komersial sebesar 0,02 g/L

sebagai representasi surfaktan dan bahan organik antropogenik, di samping glukosa sebagai sumber karbon utama. Berdasarkan hubungan stoikiometri [12], dibutuhkan $\pm 0,017$ g glukosa per 500 mL larutan. Penambahan sumber nitrogen (NH_4Cl) dan fosfor (KH_2PO_4) dalam jumlah kecil (masing-masing 0,004 g dan 0,001 g) tidak dilakukan karena tidak menjadi faktor pembatas dalam sistem kontrol non-biologis jangka pendek.

Pengujian Efektivitas dan Analisis Data

Pengujian dilakukan secara batch pada reaktor gelas piala 500 mL dalam kondisi aerobik alami. Variasi konsentrasi *eco-enzyme* yang diuji yaitu 5%, 10%, dan 15% (v/v), masing-masing untuk enam jenis *eco-enzyme*, sehingga total terdapat 18 kombinasi perlakuan. Konsentrasi awal (C_0) sampel diukur sebelum *running*, kemudian pengukuran dilakukan setiap hari hingga hari ke-12 atau tercapai *steady state*. Efektivitas degradasi dihitung dengan persamaan berikut:

$$\% \text{ Degradasi} = ((C_0 - C_e) / C_0) \times 100\% \quad (1)$$

dengan C_0 adalah konsentrasi awal dan C_e adalah konsentrasi akhir parameter COD setelah perlakuan. Parameter air dianalisis berdasarkan SNI yang berlaku (pH: SNI 06-6989.11-2004; DO: SNI 06-6989.14-2004; suhu: SNI 06-6989.23-2005; COD: SNI 6989.2-2019).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Awal Air Sungai Batang Arau

Karakteristik awal Sungai Batang Arau ditunjukkan pada Tabel 1. Nilai pH (6,92-7,10) dan suhu (26-30 °C) masih dalam kisaran baku mutu Kelas II PP No. 22 Tahun 2021. Namun nilai DO berfluktuasi pada rentang 1,34-5,97 mg/L, dengan sebagian hasil berada di bawah ambang 4 mg/L. COD (19,7-35,2 mg/L) sebagian besar melampaui baku mutu, menandakan kondisi pencemaran organik ringan hingga sedang pada titik pemantauan hulu-tengah.

Tabel 1. Karakteristik Awal Air Sungai Batang Arau

No	Parameter	Hasil	Satuan	Baku Mutu
1	pH	6,92-7,10	-	6-9
2	Suhu	26,0-30,5	°C	Dev 3
3	DO	1,34-5,97	mg/L	≥ 4
4	COD	19,7-35,2	mg/L	≤ 25

(Sumber: DLH UPTD Laboratorium Lingkungan Kota Padang, 2025; Metode: SNI 6989.11:2019, SNI 6989.23:2005, SNI 6989.14:2004, SNI 6989.2:2019) Data merujuk pada titik pemantauan di bagian hulu hingga tengah aliran Sungai Batang Arau (kawasan permukiman sekitar Padang Besi-Lubuk Begalung); karena tingkat pencemaran meningkat ke arah hilir, rentang nilai ini mencerminkan kondisi pencemaran ringan hingga sedang dan bukan kondisi paling tercemar di muara.

Karakteristik dan Bioaktivitas *Eco-enzyme*

Hasil fermentasi tiga bulan menunjukkan seluruh *eco-enzyme* bersifat asam (pH 3-4), dengan pH terendah pada *eco-enzyme* kulit jeruk dan nanas. Suhu fermentasi stabil pada 25,2-25,4 °C, mengindikasikan fermentasi berlangsung dalam kondisi mesofilik. Konsentrasi DO rendah (2,2-2,3 mg/L) konsisten dengan kondisi anaerob fakultatif. Nilai COD bervariasi 47.400-72.400 mg/L, dengan nilai tertinggi pada *eco-enzyme* kulit jeruk dan nanas yang menandakan kandungan senyawa organik mudah teroksidasi yang lebih besar (Tabel 2).

Tabel 2. Karakteristik Fisikokimia *Eco-enzyme*

No	Jenis <i>Eco-enzyme</i>	pH	Suhu (°C)	DO (mg/L)	COD (mg/L)
1	Pepaya	4	25,3	2,0	47.400
2	Semangka	4	25,3	2,2	51.300
3	Pisang	4	25,2	2,3	62.200
4	Jeruk	3	25,4	2,2	72.400
5	Nanas	3	25,4	2,3	70.150
6	Campuran	4	25,3	2,2	55.800

(Sumber: Hasil pengujian Laboratorium Penelitian DTL UNAND, 2025)

Hasil uji bioaktivitas tiga enzim utama disajikan pada Tabel 3. Aktivitas protease tertinggi diperoleh pada *eco-enzyme* kulit jeruk ($9,58 \times 10^{-3}$ U/mL), diikuti pisang ($8,62 \times 10^{-3}$ U/mL) dan semangka ($7,55 \times 10^{-3}$ U/mL). Kandungan nitrogen dan protein yang lebih tinggi pada kulit jeruk dan semangka mendukung pertumbuhan mikroba proteolitik seperti *Bacillus* sp. dan *Aspergillus* sp. selama fermentasi [13].

Aktivitas amilase tertinggi terdapat pada kulit pisang (0,959 U/mL), diikuti jeruk (0,950 U/mL) dan campuran (0,946 U/mL); kandungan karbohidrat tinggi pada substrat tersebut mendukung pertumbuhan mikroba amilolitik. Aktivitas lipase tertinggi pada kulit jeruk dan pisang (masing-masing 0,734 U/mL); tingginya kandungan minyak atsiri dan trigliserida pada kedua bahan ini mendukung aktivitas mikroba lipolitik [14]. Hasil ini mengonfirmasi bahwa komposisi bahan baku fermentasi berpengaruh signifikan terhadap profil enzim yang terbentuk.

Profil enzim ini berkaitan langsung dengan kemampuan masing-masing *eco-enzyme* dalam menurunkan nilai COD. Protease, amilase, dan lipase menghidrolisis protein, karbohidrat, dan lemak menjadi senyawa sederhana yang lebih mudah dioksidasi oleh mikroorganisme, sehingga semakin lengkap dan tinggi aktivitas ketiga enzim, semakin besar potensi penurunan beban organik terukur sebagai COD [13], [15]. *Eco-enzyme* kulit pisang dan nanas yang memiliki kombinasi aktivitas amilase dan lipase tinggi (amilase 0,959 dan

0,847 U/mL; lipase 0,734 dan 0,600 U/mL) konsisten dengan nilai COD akhir terendah pada konsentrasi 5% (Gambar 4). Sebaliknya, *eco-enzyme* kulit jeruk yang memiliki aktivitas protease tertinggi namun disertai kandungan asam sitrat tinggi cenderung menghasilkan COD akhir lebih besar pada konsentrasi yang dinaikkan, karena akumulasi asam organik menurunkan pH lingkungan di bawah kisaran optimum enzim (amilase 6-7, protease 7-9, lipase 7-8) dan menghambat mikroba degradator [9], [16]. Dengan demikian, kinerja penurunan COD tidak hanya ditentukan oleh besarnya satu jenis aktivitas enzim, tetapi oleh keseimbangan antara ketiga aktivitas enzim dan kondisi pH sistem.

Tabel 3. Aktivitas Enzim Protease, Amilase, dan Lipase pada *Eco-enzyme*

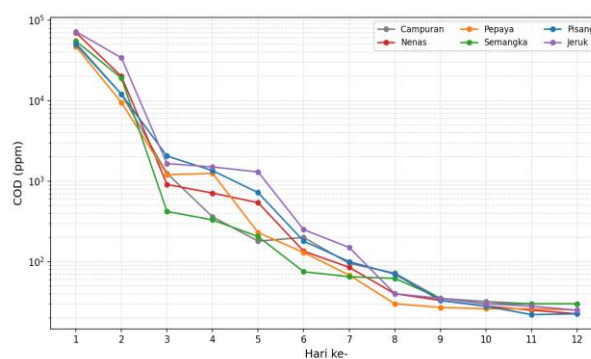
No	Jenis <i>Eco-enzyme</i>	Protease (U/mL)	Amilase (U/mL)	Lipase (U/mL)
1	Jeruk	$9,58 \times 10^{-3}$	0,950	0,734
2	Pepaya	$6,95 \times 10^{-3}$	0,521	0,500
3	Nanas	$2,67 \times 10^{-4}$	0,847	0,600
4	Semangka	$7,55 \times 10^{-3}$	0,762	0,500
5	Pisang	$8,62 \times 10^{-3}$	0,959	0,734
6	Campuran	$3,13 \times 10^{-3}$	0,946	0,334

(Sumber: Hasil pengujian Laboratorium Biokimia FMIPA UNAND, 2025)

Pengaruh *Eco-enzyme* terhadap COD Konsentrasi 5%

Gambar 1 menyajikan dinamika COD selama 12 hari pengamatan pada konsentrasi *eco-enzyme* 5% untuk seluruh jenis kulit buah. Pada hari pertama, nilai COD seluruh perlakuan berada pada kisaran 47.450-72.450 ppm, mencerminkan tingginya beban organik kontribusi *eco-enzyme* itu sendiri sebagai sumber substrat. Penurunan paling drastis terjadi pada hari ke-1 hingga ke-3, di mana nilai COD turun dua hingga tiga orde menjadi 420-2.040 ppm. Pola ini menggambarkan fase oksidasi dan biodegradasi intensif oleh enzim aktif (protease, amilase, lipase) bersamaan dengan aktivitas mikroorganisme indigenous yang masih dalam fase eksponensial.

Memasuki hari ke-4 hingga ke-7, laju penurunan melambat dan nilai COD bergerak ke kisaran ratusan ppm. Mulai hari ke-8 hingga ke-12 sistem mendekati kondisi *steady state* dengan nilai COD akhir hanya 22-30 ppm. *Eco-enzyme* kulit pisang dan nanas mencapai COD akhir terendah (22,5 ppm), diikuti jeruk dan pepaya (25 ppm), sedangkan campuran dan semangka berakhir pada 30 ppm. Hasil ini menegaskan bahwa pada konsentrasi rendah (5%) keseimbangan antara beban substrat awal dan kapasitas degradasi mikrobial-enzimatik tercapai dengan baik, sehingga COD akhir mendekati baku mutu Kelas II PP No. 22 Tahun 2021 (≤ 25 mg/L) [2].

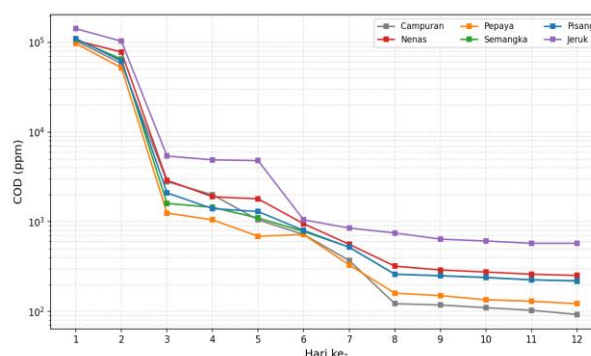


Gambar 1. Pengaruh jenis kulit buah dalam *eco-enzyme* terhadap nilai COD pada beberapa hari proses (konsentrasi 5%)

Pengaruh *Eco-enzyme* terhadap COD Konsentrasi 10%

Gambar 2 memperlihatkan profil penurunan COD pada konsentrasi 10% selama 12 hari. Nilai awal COD lebih tinggi dari perlakuan 5%, yaitu 97.150-142.150 ppm, akibat penambahan volume *eco-enzyme* yang dua kali lipat. Penurunan tetap berlangsung tajam pada hari ke-1 hingga ke-3 (dua orde) namun kurva mendatar pada nilai yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan 5%. Pada hari ke-12, COD akhir berada pada kisaran 92,5-575 ppm, jauh di atas hasil perlakuan 5%.

Perlakuan campuran (92,5 ppm) dan pepaya (122,5 ppm) memperlihatkan kinerja terbaik pada konsentrasi ini, sementara jeruk justru mencatat nilai akhir tertinggi (575 ppm). Tingginya nilai akhir COD pada perlakuan jeruk diduga disebabkan oleh akumulasi asam sitrat yang menurunkan pH lingkungan dan menghambat pertumbuhan mikroba degradator [16]. Secara umum, peningkatan dosis dari 5% ke 10% memang mempercepat reaksi awal, tetapi tidak diikuti oleh perbaikan COD akhir karena sebagian besar tambahan *eco-enzyme* justru bertindak sebagai beban organik baru yang harus ikut didegradasi.



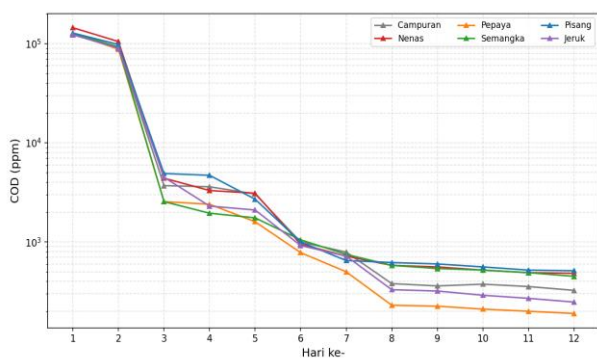
Gambar 2. Pengaruh jenis kulit buah dalam *eco-enzyme* terhadap nilai COD pada beberapa hari proses (konsentrasi 10%)

Pengaruh *Eco-enzyme* terhadap COD Konsentrasi 15%

Gambar 3 menampilkan dinamika COD pada konsentrasi 15%, yang merupakan dosis tertinggi pada penelitian ini.

Beban awal COD meningkat menjadi 123.050-144.800 ppm. Pola penurunan mengikuti tren serupa konsentrasi sebelumnya — fase reduksi cepat pada hari ke-1 sampai ke-3, fase transisi pada hari ke-4 hingga ke-7, dan fase *steady state* setelah hari ke-9 namun nilai COD akhir berada pada kisaran tertinggi, yaitu 190-512,5 ppm.

Kulit pepaya menunjukkan COD akhir terendah pada konsentrasi ini (190 ppm), diikuti jeruk (247,5 ppm) dan campuran (325 ppm). Sebaliknya, perlakuan pisang (512,5 ppm) dan nanas (482,5 ppm) menghasilkan residu COD tertinggi. Penambahan *eco-enzyme* yang berlebihan tampaknya memicu kompetisi substrat antar mikroorganisme dan keterbatasan transfer oksigen pada sistem batch tertutup [18], [19]. Temuan ini sejalan dengan konsep dosis optimum dalam aplikasi *eco-enzyme*, di mana penambahan dosis di atas titik optimum tidak lagi proporsional dengan peningkatan kinerja pengolahan.



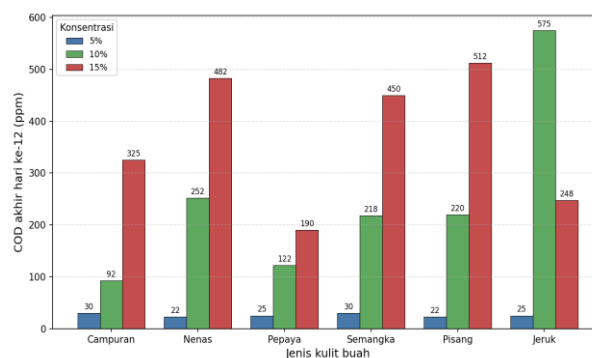
Gambar 3. Pengaruh jenis kulit buah dalam eco-enzyme terhadap nilai COD pada beberapa hari proses (konsentrasi 15%)

Perbandingan COD Akhir Hari ke-12

Gambar 4 merangkum nilai COD residual pada hari ke-12 untuk setiap kombinasi jenis kulit buah dan konsentrasi. Terdapat kecenderungan kuat bahwa peningkatan konsentrasi *eco-enzyme* dari 5% ke 15% justru meningkatkan COD akhir pada hampir seluruh jenis kulit buah. Pada konsentrasi 5%, residu COD seluruh perlakuan terkonsentrasi pada nilai rendah (22-30 ppm); pada konsentrasi 10% nilai naik menjadi 92-575 ppm; dan pada konsentrasi 15% mencapai 190-512 ppm. Di antara tiga variasi yang diuji, konsentrasi 5% memberikan nilai COD akhir terendah. Perlu ditegaskan bahwa karena penelitian ini hanya menguji tiga tingkat konsentrasi (5%, 10%, dan 15%) dan belum mencakup variasi di bawah 5% maupun di antara 5-10%, hasil ini menunjukkan 5% sebagai konsentrasi terbaik di antara variasi yang dikaji, bukan necessarily titik optimum mutlak; penentuan dosis optimum sesungguhnya memerlukan pengujian pada rentang konsentrasi yang lebih rapat. Kecenderungan naiknya COD akhir seiring meningkatnya dosis terjadi karena *eco-enzyme* itu sendiri

merupakan cairan dengan beban organik sangat tinggi (COD 47.400-72.400 mg/L; Tabel 2), sehingga penambahan volume *eco-enzyme* yang lebih besar berarti memasukkan substrat organik tambahan yang harus ikut didegradasi dalam sistem batch tertutup dengan transfer oksigen terbatas. Fenomena serupa dilaporkan pada pengolahan air dengan *garbage enzyme*, di mana penambahan dosis enzim justru menaikkan BOD dan COD akibat kontribusi bahan organik dari larutan enzim dan memperpanjang waktu biodegradasi.

Perbandingan antar jenis kulit buah menunjukkan *eco-enzyme* nanas dan pisang sebagai bahan baku terbaik pada konsentrasi 5% (COD akhir 22 ppm), sementara pepaya menjadi pilihan paling stabil ketika konsentrasi dinaikkan ke 15% (COD akhir 190 ppm). Hasil ini relevan untuk pengembangan formulasi praktis: untuk pengolahan air dengan beban organik ringan-sedang yang merepresentasikan kondisi Sungai Batang Arau, *eco-enzyme* kulit nanas/pisang pada konsentrasi 5% sudah memberikan efektivitas tertinggi tanpa perlu menambah dosis.



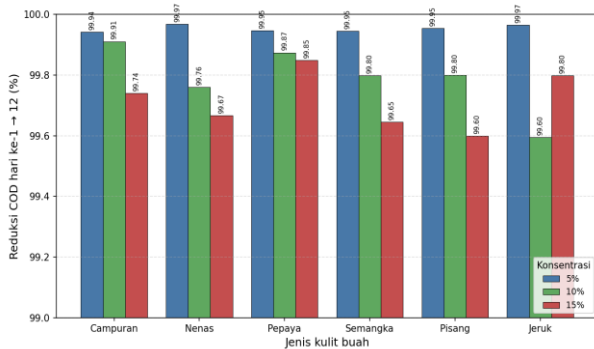
Gambar 4. Pengaruh konsentrasi *eco-enzyme* terhadap nilai COD akhir hari ke-12 untuk setiap jenis kulit buah

Reduksi Persentase COD Hari 1 ke Hari 12

Gambar 5 menyajikan persentase reduksi COD dari hari ke-1 hingga hari ke-12 untuk seluruh perlakuan. Seluruh kombinasi mencapai reduksi di atas 99,5% relatif terhadap nilai puncak hari pertama, mengindikasikan bahwa secara absolut sistem berhasil menguraikan sebagian besar beban organik yang masuk. Reduksi tertinggi tercatat pada perlakuan *eco-enzyme* nanas 5% (99,97%) dan pisang 5% (99,96%), sedangkan reduksi terendah terjadi pada pisang 15% (99,60%) dan jeruk 10% (99,60%).

Walaupun selisih persentase tampak kecil pada skala 99-100%, perbedaan ini bermakna besar dalam istilah COD absolut: pada konsentrasi 5% residu hanya 22-30 ppm, sedangkan pada 15% residu mencapai 190-512 ppm — yaitu satu orde lebih tinggi. Indikator efektivitas yang lebih tepat untuk membandingkan kinerja antar perlakuan adalah COD akhir absolut (Gambar 4), bukan reduksi persentase semata. Penilaian gabungan dari

Gambar 1-5 memperkuat kesimpulan bahwa *eco-enzyme* kulit nenas atau pisang pada konsentrasi 5% memberikan kinerja terbaik di antara variasi konsentrasi yang dikaji untuk pengolahan air sungai tercemar berbasis sistem batch.



Gambar 5. Pengaruh waktu proses terhadap penurunan nilai COD (reduksi COD hari ke-1 hingga ke-12)

Perbandingan Parameter Air Sebelum dan Sesudah Perlakuan

Perubahan parameter air pada perlakuan terbaik (*eco-enzyme* kulit nenas/pisang 5%) sebelum dan sesudah 12 hari proses diringkas pada Tabel 4. Setelah perlakuan, nilai COD turun drastis hingga 22-30 mg/L dan memenuhi baku mutu Kelas II PP No. 22 Tahun 2021 (≤ 25 mg/L), sementara DO meningkat dari kisaran rendah (1,34-5,97 mg/L) menjadi > 4 mg/L seiring berkurangnya beban organik dan pulihnya aktivitas oksidatif. Nilai pH bergerak menuju kisaran netral (6,8-7,2) setelah sempat menurun pada hari-hari awal akibat asam organik dari *eco-enzyme*, dan suhu relatif stabil pada kisaran 26-30 °C. Pola ini menunjukkan bahwa penurunan COD diiringi perbaikan parameter pendukung kualitas air, sejalan dengan peran *eco-enzyme* dalam mendukung proses *self-purification* [8].

Tabel 4. Perbandingan Parameter Air Sebelum dan Sesudah Perlakuan *Eco-enzyme* 5% (Kulit Nanas/Pisang)

No	Parameter	Sebelum	Sesudah	Baku Mutu Kelas II
1	pH	6,92-7,10	6,8-7,2	6-9
2	Suhu (°C)	26,0-30,5	26,5-29,8	Dev 3
3	DO (mg/L)	1,34-5,97	4,5-6,2	≥ 4
4	COD (mg/L)	19,7-35,2	22-30	≤ 25

(Sumber: Hasil pengujian penelitian, 2025; nilai sesudah merupakan kondisi steady state hari ke-12)

KESIMPULAN

Eco-enzyme dari limbah kulit buah memiliki bioaktivitas enzimatis (protease, amilase, dan lipase) yang berperan dalam degradasi senyawa organik sehingga mampu menurunkan COD pada air sungai artifisial secara signifikan. Profil penurunan COD selama 12 hari memperlihatkan tiga fase yang konsisten yaitu fase oksidasi-biodegradasi intensif (hari ke-1 hingga ke-3), fase transisi (hari ke-4 hingga ke-7), dan fase *steady state* (hari ke-8 hingga ke-12).

Di antara tiga variasi yang diuji, konsentrasi 5% memberikan kinerja terbaik dengan COD akhir terendah (22-30 ppm) dan reduksi $> 99,9\%$, sedangkan konsentrasi 10% dan 15% menghasilkan COD akhir lebih tinggi (berturut-turut 92-575 ppm dan 190-512 ppm) akibat tambahan beban organik dari *eco-enzyme* itu sendiri. Berdasarkan jenis bahan baku, *eco-enzyme* kulit nenas dan pisang pada konsentrasi 5% menunjukkan kinerja terbaik dengan COD akhir 22 ppm, mendekati baku mutu Kelas II PP No. 22 Tahun 2021. Disarankan pengujian pada air sungai nyata, perpanjangan waktu kontak melebihi 12 hari, serta kombinasi *eco-enzyme* dengan metode lain seperti aerasi atau biofilter untuk meningkatkan efisiensi penurunan nilai COD. Sebagai keterbatasan, penelitian ini hanya menguji tiga tingkat konsentrasi sehingga penentuan dosis optimum yang sesungguhnya memerlukan variasi konsentrasi di bawah 5% dan di antara 5-10% pada penelitian lanjutan.

ACKNOWLEDGEMENT

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Magister Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Andalas atas dukungan fasilitas Laboratorium Penelitian DTL UNAND, Laboratorium Biokimia FMIPA UNAND yang telah memfasilitasi pengujian bioaktivitas enzim, serta UPTD Laboratorium Lingkungan DLH Kota Padang atas dukungan analisis kualitas air Sungai Batang Arau.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rr. M. Nivita, H. Piyatno, dan R. Nunik, "Analisis Akses Masyarakat DKI Jakarta Terhadap Air Bersih Pasca Privatisasi Air Tahun 2009-2014," *Journal of Politic and Government Studies*, vol. 5, no. 4, 2015.
- [2] Republik Indonesia, Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Jakarta, 2021.
- [3] F. Septiawan, R. E. Putera, dan K. Kusdarini, "Implementasi Program Pengendalian Pencemaran dan Perusakan Lingkungan Hidup di Sungai Batang Arau oleh Dinas Lingkungan Hidup Kota Padang," *Jurnal Ilmu Administrasi Negara ASIAN*, vol. 12, no. 1, hlm. 27-42, 2024.
- [4] M. Samiksha dan S. Kerkar, "Application of Eco-Enzyme for Domestic Waste Water Treatment," *International*

Journal for Research in Engineering Application & Management, vol. 5, no. 11, hlm. 2454-9150, 2020.

- [5] N. Benny, R. Shams, K. K. Dash, V. K. Pandey, dan O. Bashir, "Recent trends in utilization of citrus fruits in production of eco-enzyme," *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 13, 2023.
- [6] S. C. Das, O. Khan, A. H. Khadem, M. A. Rahman, S. Bedoura, M. A. Uddin, dan M. S. Islam, "Evaluating the biocatalytic potential of fruit peel-derived eco-enzymes for sustainable textile wastewater treatment," *Results in Engineering*, vol. 21, 2024.
- [7] E. Agustina, "Pengaruh Eco-Enzyme pada Air Baku Sungai Borang Palembang Terhadap Nilai Parameter Conductivity, TDS, dan Zat Organik," *Jurnal Kolaboratif Sains*, vol. 5, no. 6, 2022.
- [8] K.-E. Lindenschmidt, *Surface Water Quality Modelling*. MDPI Books, 2023.
- [9] M. Hemalatha dan P. Visantini, "Potential use of eco-enzyme for the treatment of metal based effluent," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 716, 2020.
- [10] A. Avcı, S. Demir, dan F. A. Akçay, "Production, properties and some applications of protease from alkaliphilic *Bacillus* sp. EBTA6," *Preparative Biochemistry and Biotechnology*, vol. 51, no. 8, 2021.
- [11] T. T. M. Nguyen, H.-J. Cho, dan H.-G. Hur, "Purification and characterization of strong simultaneous enzyme production of protease and α -amylase from an extremophile-*Bacillus* sp. FW2 and its possibility in food waste degradation," *Fermentation*, vol. 8, no. 1, 2022.
- [12] G. Tchobanoglous, F. L. Burton, dan H. D. Stensel, *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, edisi ke-5. Metcalf & Eddy, 2014.
- [13] F. D. A. Facchini et al., "Enhanced lipase production of *Fusarium verticillioides* by using response surface methodology and wastewater pretreatment application," *Journal of Biochemical Technology*, vol. 6, no. 3, 2015.
- [14] G. G. Gumilar et al., "Characterization and Enzymatic Evaluation of Ecoenzyme Derived from Fruit and Vegetable Waste: An Effort to Achieve Zero Waste Concept," *Baghdad Science Journal*, 2024.
- [15] M. Kuddus, *Enzymes in Food Biotechnology: Production, Applications, and Future Prospects*. Academic Press, 2018.
- [16] F. E. Tang dan C. W. Tong, "A Study of the Garbage Enzyme's Effects in Domestic Wastewater," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 60, 2011.
- [17] C. Arun dan P. Sivashanmugam, "Solubilization of waste activated sludge using a garbage enzyme produced from different pre-consumer organic waste," *RSC Advances*, vol. 5, no. 63, 2015.
- [18] F. Nazim, "Treatment of Synthetic Greywater Using 5% and 10% Garbage Enzyme Solution," *Bonfring Int. J. Ind. Eng. Manag. Sci.*, vol. 3, no. 4, hlm. 111-117, 2013.